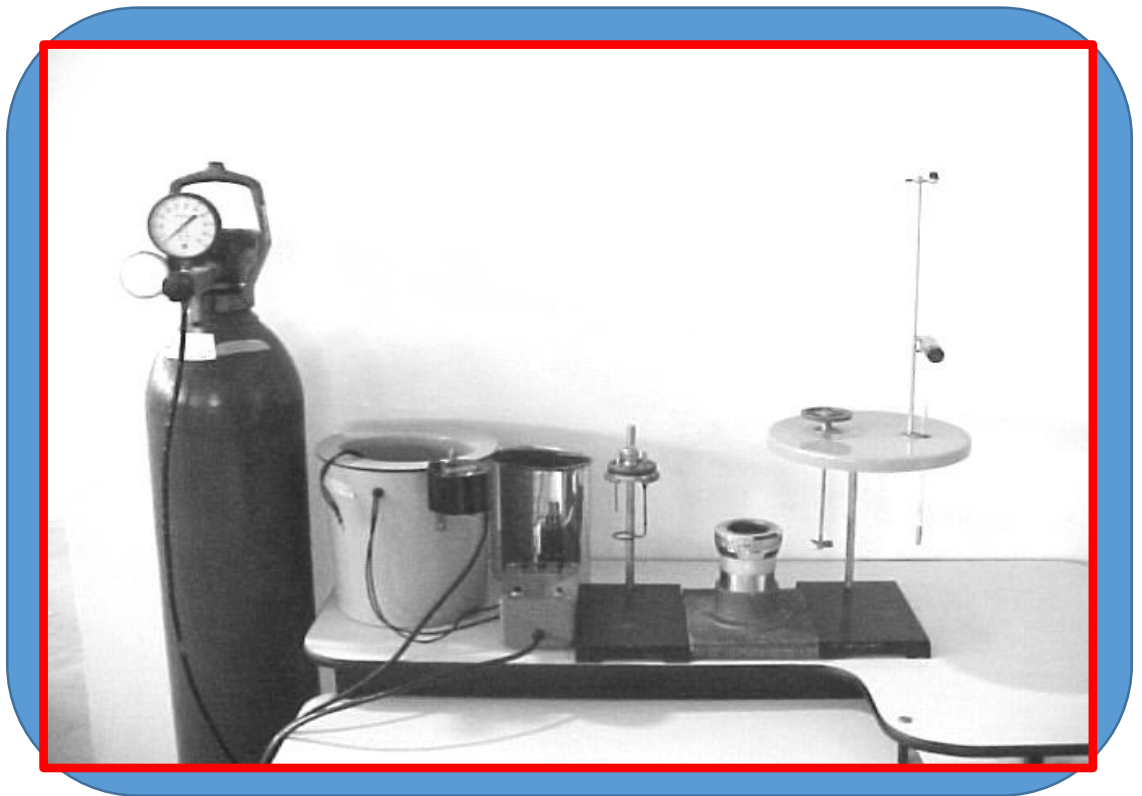


EXPERIENCIA DE LABORATORIO N° 2

DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO



Jorge Favio SIFUENTES SANCHO

Julio – 2014

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	3
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	4
4. ENSAYO	11
5. RESULTADOS	16
6. MATERIAL DE REFERENCIA	17
7. ANEXOS	18

EXPERIENCIA DE LABORATORIO N° 2

DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los **combustibles fósiles** constituyen la principal fuente de energía primaria para la industria. Durante el proceso de combustión la **energía química** del combustible es transformada en energía molecular cinética o potencial de los productos.

Los productos pueden producir trabajo directo o indirectamente, o actuar como almacenes de calor. El término relativo a la **energía**, más común, asociado con la combustión es el **Valor Calorífico** o **Poder Calorífico**.

2. OBJETIVOS

Cuadro N° 1. Objetivos

OBJETIVO GENERAL	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS OPERATIVOS
Obtener la capacidad térmica de absorción de la bomba calorimétrica, constante K, a partir de un combustible líquido cuyo poder calorífico es conocido.	Lograr conocimientos y pericia, en el manejo de equipo e instrumentos de la Bomba Calorimétrica.	Determinar T_e , $T_{máx}$ Calcular t_1 , t_2 , R_1 , R_2 Calcular P_1 , P_2
	Calcular el calor Q desarrollado por la combustión de $1\text{ [cm}^3\text{]}$ del combustible Diesel N°2	Considerar el PCS del Diesel 10 000 [cal/g], y Utilizar la ecuación [2]
	Calcular el parámetro ΔT a partir de los datos provenientes del ensayo en la Bomba Calorimétrica.	Utilizar la ecuación [5]
Determinar el Poder Calorífico de un líquido mediante un proceso experimental, usando para ello la Bomba Calorimétrica de Emerson, para ser usado en el cálculo del rendimiento térmico de equipos y dispositivos	Determinar la densidad del combustible líquido a condiciones normales	Determinar el peso específico usando la balanza de Westphal.
	Reconocer qué tipo de Poder Calorífico se obtiene del proceso de la combustión en la Bomba Calorimétrica.	Notar que en la bomba calorimétrica de Emerson se obtiene el PCS
	Calcular el Poder Calorífico del combustible líquido ensayado	Utilizar la ecuación [7]

Fuente: Elaboración propia.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

El **Poder Calorífico** de un combustible es la cantidad de calor que se puede obtenerse de un combustible cuando se quema en forma completa y sus productos son enfriados hasta la temperatura original de la mezcla aire-combustible. [Kcal/kg], [Kcal / m³].

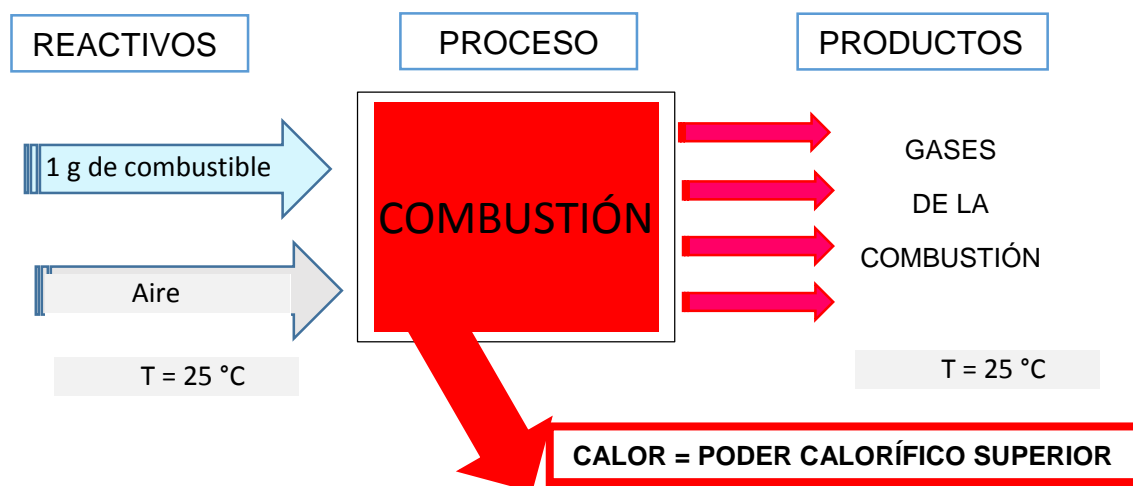


Figura N° 1. Poder Calorífico de un combustible
Fuente: Elaboración propia

Poder Calorífico Superior (PCS): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible, cuando el vapor de agua originado en la combustión está completamente condensado.

Poder Calorífico Inferior (PCI): Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa del combustible, cuando toda el agua en los productos permanece como vapor.

Unidades: [Kcal/kg], [Kcal/m³]. : [BTU/lb], [BTU/ft³]

La diferencia entre el PCS y el PCI está dado por:

$$\text{PCS} - \text{PCI} = \text{Calor latente del vapor de agua.} \quad [1]$$

de combustión a la temperatura de la mezcla original de aire-combustible.

Cada combustible tiene un Poder Calorífico característico, tal como se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro N° 2. Poder Calorífico de diferentes combustibles fósiles

COMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO INFERIOR		PODER CALORÍFICO SUPERIOR		DENSIDAD	
Gaseosos @ 0 °C and 1 atm	kWh/kg	kcal/kg	kWh/kg	kcal/kg	g/m3	
Gás Natural	13	11.259	15	12.474	777	
Hidrogênio	33	28.712	39	33.959	90	
Gás Refinaria	13	11.201	14	12.169	1.158	
Líquidos	kWh/kg	kcal/kg	kWh/kg	kcal/kg	g/cm3	g/l
Petróleo Cru	12	10.195	13	10.878	0,847	847
Gasolina	12	10.377	13	11.115	0,745	745
Liquefied petroleum gas (LPG)	13	11.132	14	11.979	0,508	508
Liquefied natural gas (LNG)	14	11.616	15	13.186	0,428	428
Butane	13	10.814	14	11.754	0,585	585
Isobutane	12	10.715	14	11.726	0,56	560
Isobutylene	12	10.706	13	11.521	0,595	595
Propane	13	11.057	14	11.999	0,507	507
Solid Fuels	kWh/kg	kcal/kg	kWh/kg	kcal/kg		
Coal (wet basis) [6]	6	5.429	7	5.725		
Bituminous coal (wet basis) [7]	7	6.239	8	6.513		
Coking coal (wet basis)	8	6.833	8	7.133		
Sugar cane bagasse	4	3.596	5	3.906		
Petroleum coke	8	7.047	9	7.478		

Fuente:

Los valores del Poder Calorífico pueden cambiar dependiendo de diversos factores, como el lugar de origen del combustible, la materia prima usada para obtenerlas, el proceso utilizado para su obtención, entre otros.

Debido a esto, son muy importantes las mediciones del Poder Calorífico de los combustibles, para lo cual puede usarse un equipo conocido como **Bomba Calorimétrica**.

BOMBA CALORIMÉTRICA

La llamada bomba calorimétrica se utiliza para determinar el Poder Calorífico de un combustible cuando se quema a volumen constante.

Hay varios tipos de bombas calorimétricas, tales como: La de Atwater, Davis; Emerson, Mahler, Parr, Peters y Williams. Una de estas bombas, el calorímetro no adiabático de Emerson, se muestra en la figura siguiente.

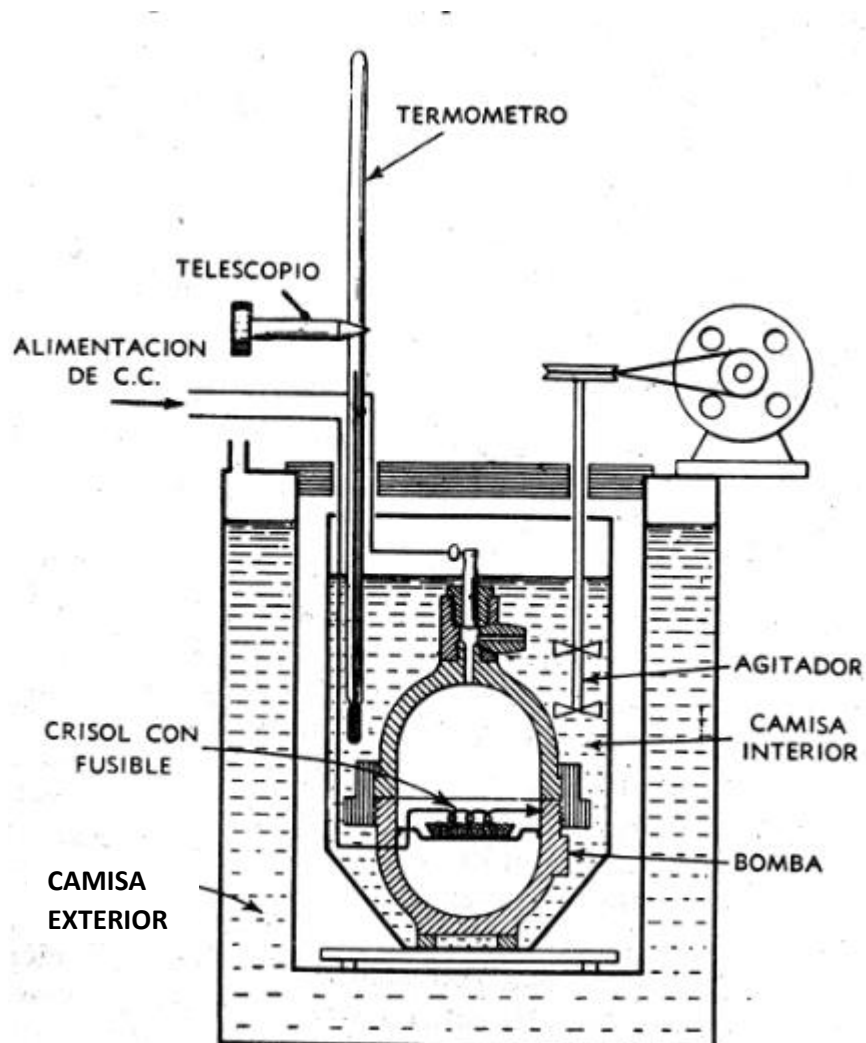


Figura N° 2. Bomba Calorimétrica no adiabática de Emerson.
Fuente: Jesse Seymour

Una determinada cantidad de combustible (1 cm^3), cuyo Poder Calorífico (PCS) se desea determinar, se coloca en el crisol para combustible (Si el combustible es sólido, deberá colocarse en forma de pastilla) dentro de la bomba. En este crisol se introduce una bobina de alambre fino. La bomba se carga con oxígeno a presión. Cuando pasa una corriente eléctrica por el alambre, el combustible se enciende. La bomba está rodeada por una camisa de agua a fin de absorber el calor desarrollado por la combustión.

La bomba también tiene una camisa exterior y un espacio de aire alrededor del recipiente o camisa de agua central para minimizar las pérdidas de calor al ambiente. Aunque el agua del recipiente interior absorbe la mayor cantidad de calor, este calor no es el valor calorífico del combustible, por las siguientes razones:

1. La bomba en sí absorbe cierto calor.
2. Hay intercambio de calor con la camisa externa.
3. El alambre de ignición libera cierta energía
El calor liberado por el alambre de ignición. El valor calorífico del alambre de hierro es de 1600 cal por gramo. Para trabajos de poca precisión es suficiente utilizar 10 cal.
4. Los productos de combustión no se enfrían a la temperatura original.
5. Debido a que la combustión se produce en presencia de oxígeno, se alcanza altas temperaturas, lo que resulta en la:
Formación de ácido nítrico, 230 cal/g. Para trabajos de poca precisión es suficiente utilizar 10 cal.
Formación de ácido sulfúrico en lugar del anhídrido sulfúrico, es de 1300 cal/g de azufre originalmente presente en la muestra, los que no se producirían en el proceso de combustión normal.

El error que se comete está cerca del 1 por ciento. Además el error se compensa casi totalmente cuando se “normaliza” la bomba. El “equivalente de agua” de la bomba es un dato suministrado por el fabricante. Es la cantidad de agua que tiene la misma capacidad térmica que la bomba y su recipiente o camisa interior (vacío). Cuando se duda de este valor, la bomba ha de ser

normalizada. Esto puede hacerse quemando en ella un combustible de valor calorífico conocido. El National Bureau of Standards provee un compuesto de valor calorífico certificado.

Hay que usar un termómetro especial para calorímetros. El termómetro ASTM designado por 56F-49T tienen un alcance de 66 [°F] a 95 [°F] (19 a 35 [°C]), con subdivisiones de 0,005 [°F]. Se utiliza una lente de aumento para llevar la precisión de la lectura a 0,001 [°F].

La combustión del combustible nos da un calor Q.

$$Q = m_c \times PC = \forall c \times \rho_c \times PC \quad [2]$$

donde:

Q: Es el calor cedido por 1 [cm³] de combustible.

m_c: Es la masa del combustible, [g].

∀_c: Es el volumen de combustible, [1 cm³]

ρ_c: Es la densidad del combustible, a condiciones de 101,325 kPa y 25°C de temperatura.

PC: Es el Poder Calorífico del combustible obtenido a volumen constante.

Cabe mencionar que éste valor del Poder Calorífico a volumen constante difiere muy poco del Poder Calorífico a presión constante (1%), por lo que para cálculos de ingeniería pueden tomarse indistintamente.

El calor desarrollado por la combustión, ecuación [2], es transmitida hacia el elemento fluido y hacia la bomba calorimétrica.

$$Q = Q_{\text{agua}} + Q_{\text{bomba}} \quad [3]$$

$$Q = m_{\text{agua}} C_{p_{\text{agua}}} \Delta T_{\text{agua}} + m_{\text{bomba}} C_{p_{\text{bomba}}} \Delta T_{\text{bomba}}$$

$$Q = [m_{agua} C_{p_{agua}} + m_{bomba} C_{p_{bomba}}] \Delta T$$

$$Q = K \Delta T \quad [4]$$

Igualando las ecuaciones [2] y [4], se obtiene para el Poder Calorífico:

$$PC = \frac{K \cdot \Delta T}{V_c \cdot \rho_c} \quad [\text{cal/g}] \quad [5]$$

donde:

K: Es la capacidad térmica de absorción de la bomba calorimétrica proporcionada por el fabricante, 2440 [Cal / °C], u obtenida mediante “normalizar” la bomba.

ΔT: Proviene del ensayo.

$$\Delta T = (T_{\text{máx}} - T_e) + P_2 - P_1, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad [6]$$

donde: **T_{máx}** es la temperatura máxima alcanzada por el agua.

T_e es la temperatura a la cual se ha encendido el combustible

P₂ y **P₁** son factores de corrección.

$$P_2 = 0,5 \quad R_2 \times t_2, \quad P_1 = 0,5 \quad R_1 \times t_1;$$

R₁: Régimen de aumento de la temperatura por minuto antes del encendido, [°C/min].

Hay que registrar la temperatura del agua cada minuto durante cinco (05) minutos antes del encendido. Cada 30 segundos a partir del momento de encendido hasta alcanzar la temperatura máxima, y se continua midiendo cada minuto durante cinco (05) minutos.

R₂: Régimen de disminución de temperatura después de la temperatura máxima, [°C/min].

t_1 : Tiempo transcurrido desde el momento del encendido hasta alcanzar la temperatura ambiente, [min].

t_2 : Tiempo transcurrido desde la temperatura máxima a temperatura ambiente, [min].

Al valor del PC obtenido de la ecuación [6], hay que agregarle las correcciones por el calor liberado por el fusible (aproximadamente 1600 [cal/g]) o 10 cal; por la formación de ácido nítrico (230 [cal/g] de ácido nítrico) en trabajos de menor precisión considerar 10 [cal]; por formación de ácido sulfúrico (1300 [cal/g] de azufre presente en la muestra):

- .

4. ENSAYO:

Fecha: 25 de Julio del 2014

Integrantes:

Condiciones ambientales:

Presión: [kPa]

Temperatura: [°C] Bulbo seco
[°C] Bulbo húmedo

Humedad: [%]

A volumen constante

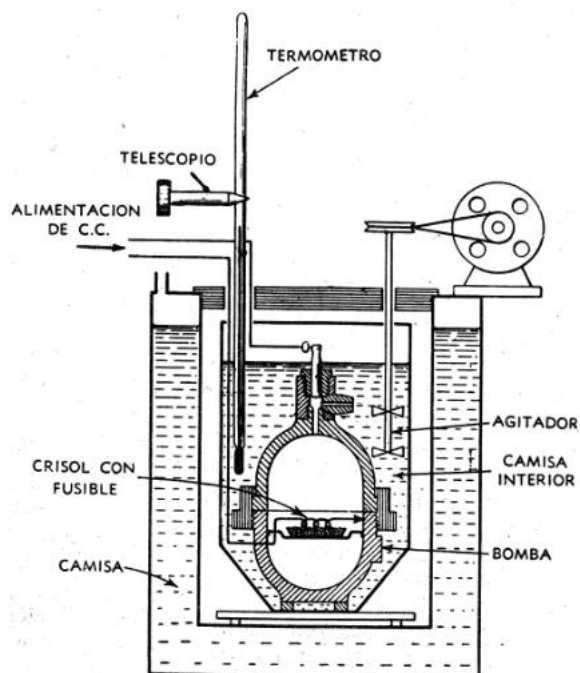


Figura N° 2. Bomba Calorimétrica no adiabática de Emerson.
Fuente: Jesse Seymour

PROCEDIMIENTO

- Pesar el recipiente interior del calorímetro vacío. Poner 1900 g de agua, con una temperatura de unos 3 [°F], aprox. 2 [°C] por debajo de la temperatura de la camisa externa. Se supone que el agua de la camisa está a temperatura ambiente.
- Una cantidad de combustible 1 [cm³] se coloca en el crisol. Elegir una longitud adecuada de un alambre de hierro puro y de aproximadamente 0,25 mm de diámetro, pesarlo e instalarlo a modo de bobina. Esta bobina debe tocar el líquido, pero no el crisol.
- Se satura el espacio con unas cuantas gotas (alrededor de 0,5 ml) de agua al fondo de la bomba para saturar el espacio. Esto causará la condensación completa del vapor de combustión, de modo que se obtendrá el Poder Calorífico Superior.
- Armar la bomba con cuidado para no derramar el combustible fuera del crisol por sacudir o golpear la bomba.
- Cargue la bomba con oxígeno a una presión de aproximadamente 20 kg/cm²; y sumerja la bomba en agua para ver que no haya fugas. Coloque la bomba en el recipiente interior. Instale el termómetro y el agitador. El termómetro debe de estar sumergido por lo menos 75 mm en el agua y a no menos de 12 mm de la bomba.
- Ponga en marcha el agitador. Deje transcurrir de 3 a 4 minutos para que se uniformice la temperatura del agua en el recipiente y tome lecturas de temperatura cada minuto durante cinco minutos. Estas lecturas se utilizan para calcular la pérdida de calor a la camisa externa.
- El combustible se enciende al hacer circular corriente eléctrica por el alambre y por estar la bomba llena de oxígeno 300 [psig].
- Registre la temperatura cada 30 segundos hasta que se alcance la temperatura máxima. El observador del termómetro debe estar muy alerta, porque el aumento de temperatura es muy grande inmediatamente después del encendido.

- Una vez alcanzada la máxima temperatura, se continuará tomando lecturas cada minuto durante cinco minutos. Estas temperaturas se necesitan para calcular la pérdida de calor a la camisa externa.
- Saque la bomba del calorímetro, suelte los gses y desarme la bomba. Junte y pee el alambre del fusible que queda.
- El calor desprendido del sistema a volumen constante es enfriado a su temperatura original y usando factores de corrección para condiciones de temperatura de 25 [°C], se btiene el Poder Calorífico:
- Pesen los restos del alambre de ignición. Limpiar la bomba y repetir el ensayo. Si los resultados del segundo ensayo difieren en mas de 1 por ciento con os del primer ensayo, será necesario hacer uno o más ensayos ulteriores. El producto del peso del agua por el aumento verdadero de temperatura del agua dividido por el peso de la muestra de combustible debe coincidir con el mismo valor, muy aproximadamente, en todos los ensayos.

DATOS

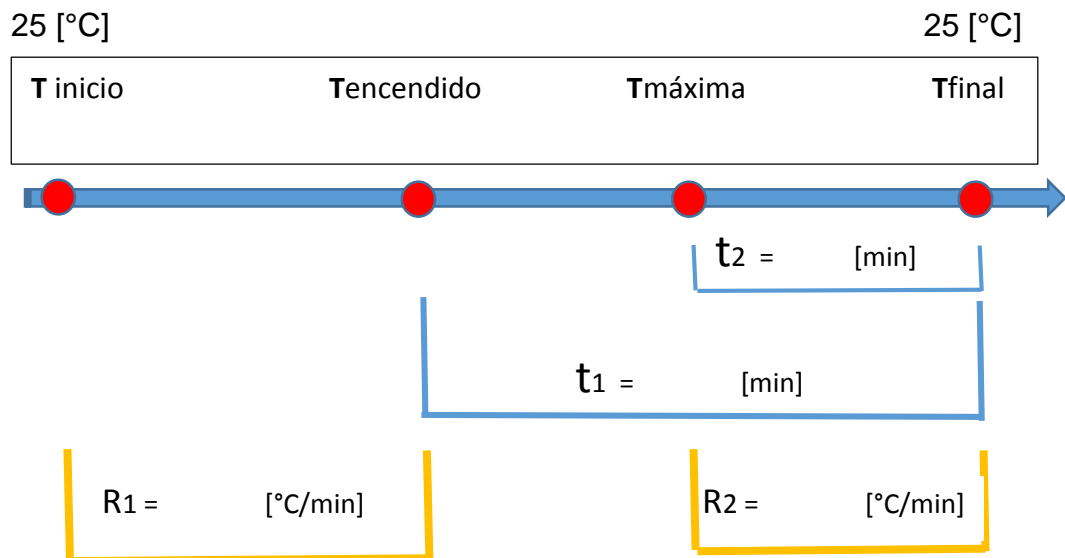


Figura N° 3. Registro de Temperaturas y tiempo

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°1. Datos

TIEMPO [min]	T agua [°C]		TIEMPO [min]	T agua [°C]		TIEMPO [min]	T agua [°C]	
0	25	Tamb	0		Tenc	??		Tmax
1								
2								
3								
4								
5								
?		Tenc	??		Tmax	???	25	Tamb

Fuente: Elaboración propia

CÁLCULOS

$$t_1 = (??? - ?) [min] = \quad ; t_2 = (??? - ??) [min] =$$

$$R_1 = \frac{T_{enc} - T_{amb}}{? - 0} = \left[\frac{^{\circ}C}{min} \right]$$

$$R_2 = \frac{T_{max} - T_{amb}}{??? - ??} = \left[\frac{^{\circ}C}{min} \right]$$

$$P_2 = 0,5 R_2 \times t_2 = \quad [^{\circ}C]$$

$$P_1 = 0,5 R_1 \times t_1 = \quad [^{\circ}C]$$

$$\Delta T = (T_{máx} - T_e) + P_2 - P_1 = \quad [^{\circ}C]$$

Aumento verdadero de temperatura.

Cálculo de la capacidad térmica de absorción de la bomba calorimétrica

Cálculo del calor entregado por la combustión del combustible:

$$Q = V_c \cdot \rho_c \cdot PC = \quad [\text{Cal/g}]$$

Luego:

$$K = \frac{Q}{\Delta T} = \quad [\text{Cal/}^\circ\text{C}]$$

Cálculo del Poder Calorífico del combustible a ensayar

Volumen del combustible a ensayar:

$$V_c = 1 \text{ [cm}^3\text{]}$$

Determinación de peso específico del combustible en la balanza de

Wespthal: $\gamma =$

$$\rho = \quad [\text{g/cm}^3]$$

Cálculo del aumento verdadero de temperatura ΔT

$$\Delta T = \quad [^\circ\text{C}]$$

La capacidad térmica de absorción de la bomba calorimétrica:

$$K = \quad [\text{Cal/}^\circ\text{C}]$$

Cálculo del Poder Calorífico del combustible ensayado:

$$PC = \frac{K \cdot \Delta T}{V_c \cdot \rho_c} = \quad [\text{Cal/g}]$$

Las correcciones a introducir:

- por el calor liberado por el fusible (aproximadamente 1600 [cal/g]) o 10 cal;
- por la formación de ácido nítrico (230 [cal/g] de ácido nítrico) en trabajos de menor precisión considerar 10 [cal];
- por formación de ácido sulfúrico (1300 [cal/g] de azufre presente en la muestra).

Cálculo del Poder Calorífico Superior:

$$\text{PCS} = \quad \quad \quad [\text{cal/g}]$$

5. RESULTADOS

Capacidad térmica de absorción de la bomba calorimétrica:

$$K = \quad \quad \quad [\text{Cal/}^{\circ}\text{C}]. \quad \text{Fabricante.}$$

$$K = \quad \quad \quad [\text{Cal/}^{\circ}\text{C}]. \quad \text{Obtenido de "normalizar" la bomba calorimétrica.}$$

Poder Calorífico Superior del combustible:

$$\text{PCS} = \quad \quad \quad [\text{Kcal/kg}]$$

6. MATERIAL DE REFERENCIA

1. Seymour Doolittle. El Laboratorio del Ingeniero Mecánico. Editorial Hispano Americana S.A. Buenos Aires 1971
2. Manual del Laboratorio de Ingeniería Mecánica.
3. Manual del Ingeniero Mecánico
4. ASME Power Test Codes, Supplements on Instruments and Apparatus; part 9, Heat of Combustion, 1943.
5. <http://www.minetur.gob.es/energia/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx>. Gases Licuados de Petróleo.
6. Refinería La Pampilla. Doc: GSTC-F_GLP; del 25 de Mayo del 2006.
7. OSINERG. Segmentos del mercado y precios del Gas Natural.
8. OSINERGMIN. Propiedades del GLP.

7. ANEXOS

- ANEXO 1:** Poder Calorífico de los combustibles gaseosos, líquidos y sólidos
- ANEXO 2:** Propiedades de varios gases ideales.
- ANEXO 3:** Composición del Gas Natural de Camisea
- ANEXO 4:** Calor necesario para producir 1 MMBTU.
- ANEXO 5:** Tarifa del mercado de Gas Natural
- ANEXO 6:** Gases Licuados del Petróleo
- ANEXO 7:** Ahorre con el gas natural. Calidda.
- ANEXO 8:** Refinería La Pampilla. Propiedades Físicas y Químicas del GLP.
- ANEXO 9:** Osinergmin. Propiedades del GLP.
- ANEXO 10:** Algunas equivalencias.